

Was hat die Blende im Fotoapparat verloren?

- Vorschläge zur Behandlung der Schärfentiefe im Physikunterricht-

Xaver Winnik* und Michaela Schulz*

*Universität Bielefeld, Universitätsstraße 25, 33615 Bielefeld
xaver.winnik@uni-bielefeld.de, mschulz@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Die Linsengleichung der geometrischen Optik besagt, dass das Bild bei einer gegebenen Brennweite und Gegenstandsweite an genau einer Stelle scharf abgebildet wird. Dies kann experimentell nachgewiesen werden. Demgegenüber steht die Alltagserfahrung, dass auf einem Foto Objekte scharf zu erkennen sind, die unterschiedlich weit von der Linse entfernt waren. Dieser Beitrag behandelt mögliche Zugänge für den Physikunterricht, die es erleichtern sollen diesen Konflikt aufzulösen. Dafür wird die Blende als wichtiger Einflussfaktor für die Schärfentiefe eingeführt. Die Abhängigkeit der Schärfentiefe von der Blendengröße, der Brennweite und der Gegenstandsweite wird mathematisch hergeleitet sowie durch eine GeoGebra-Simulationen [1] und geeignete Experimente für Schülerinnen und Schüler erfahrbar gemacht. Die so erarbeiteten Erkenntnisse können beim Fotografieren mit einer Digitalkamera bestätigt und für eine individuelle Bildgestaltung genutzt werden.

1. Einleitung

Für die Schülerinnen und Schüler ist eine Digitalkamera zumindest als Teil des Handys oder des Smartphones ein ständiger Wegbegleiter. Dies ist ein Grund dafür, dass in den letzten Jahren die Funktionsweise einer Digitalkamera im Physikunterricht oder im Schülerlabor [2],[3] thematisiert wurde. Der Fokus lag dabei auf die Erklärung der Funktionsweise eines CCD-Chips und der Bildverarbeitung (z.B.[2],[3]).

Der Fotoapparat wird als Anwendung für eine Sammellinse im Optikunterricht benannt. Dabei werden die Blende und der Begriff der Schärfentiefe nur selten eingeführt, obwohl sich damit eine Möglichkeit zur Vertiefung der Linsengleichung anbietet. Die Lochblende als Mittel zur Korrektur von Fehlsichtigkeiten des Auges wurde bereits von Colicchia et al. [4] vorgeschlagen. Da sie auch ein wichtiger Bestandteil im Fotoapparat ist, bietet sich hier eine thematische Anschlussmöglichkeit. In Simulationen und Experimenten können die Schülerinnen und Schüler den Zusammenhang zwischen dem Blendendurchmesser und der Schärfentiefe erkunden und ihr Wissen bei der Gestaltung von Fotos in der Praxis nutzen. Mit einem einfachen Aufbau lassen sich auch die Zusammenhänge zwischen der Brennweite, Gegenstandsweite und Schärfentiefe untersuchen.

2. Theorie der Schärfentiefe

Eine Kamera stellt durch eine Verschiebung des Linsensystems bezüglich der Bildebene scharf. In Abbildung 1 wird mit der Kamera der Lichtpunkt G (Fokuspunkt) fokussiert. Dieser erzeugt genau einen

Lichtpunkt auf dem Fotosensor, wodurch er scharf abgebildet wird. In diesem Beispiel befindet er sich genau in der Mitte eines Pixels des Fotosensors. Es wird vereinfacht angenommen, dass die Größe des Pixels, der Fläche entspricht, die vom Auge in der deutlichen Sehweite noch aufgelöst werden kann. Lichtpunkte, die sich etwas vor oder hinter dem Punkt G befinden, können gegebenenfalls auch nur dieses eine Pixel anregen. Der Punkt E wird Endpunkt genannt und beschreibt den Punkt, der am weitesten von der Linse entfernt ist und nur dasselbe Pixel wie Punkt G anregt. Der vorderste Punkt, für den diese Bedingung gilt, ist der Nahpunkt N. Zur besseren Verdeutlichung wurde der Strahlengang in der Nähe des Fotosensors in der Abbildung 1 oben links vergrößert.

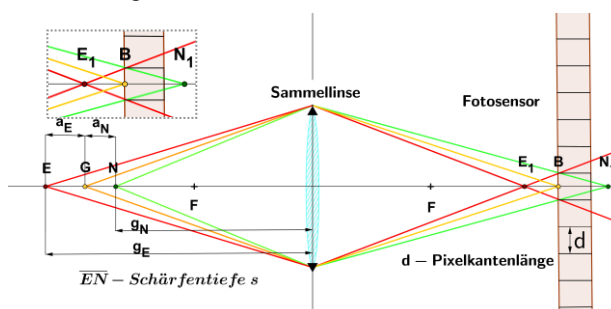


Abb. 1: Zur Definition der physikalischen Größen und der Schärfentiefe

Die Schärfentiefe s lässt sich damit als Strecke zwischen End- und Nahpunkt bzw. als Differenz zwischen den dazugehörigen Gegenstandsweiten definieren:

$$s = a_E + a_N \quad \{1\}$$

bzw.

$$S = g_E - g_N \quad \{2\}$$

Abbildung 2 zeigt als Beispiel eine Schärfentiefe von 1,13 cm. Wird nun, wie in Abbildung 3, eine Blende vor die Linse gestellt, so ändert sich das bildgebende Strahlenbündel, so dass die Punkte E und N nicht mehr die Punkte darstellen, die gerade nur das eine Pixel anregen (Abbildung 3 oben links). Der End- und Nahpunkt befindet sich nun weiter entfernt vom Punkt G. In einer GeoGebra-Simulation [1] können diese Punkte entsprechend verschoben werden (Abbildung 4). Durch den Einsatz einer Blende vergrößerte sich Schärfentiefe in diesem Beispiel von 1,13 cm auf 1,77 cm. Die Schülerinnen und Schüler haben damit die Möglichkeit zu erkennen, dass der Einsatz einer Blende die Schärfentiefe vergrößert.

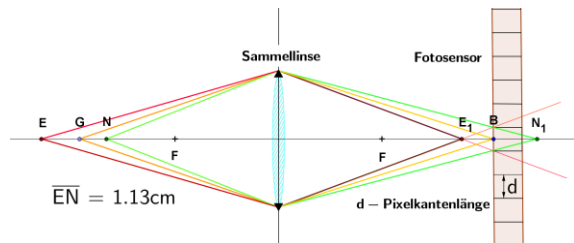


Abb. 2: Einstellen der Punkte E und N zur Ermittlung der Schärfentiefe

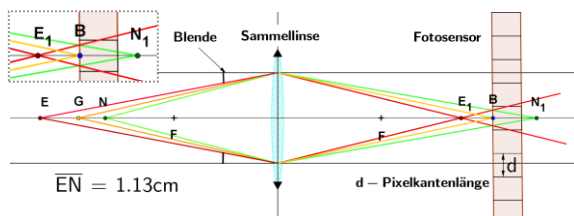


Abb. 3: Die Einführung einer Blende bewirkt einer Verschiebung des Nah- und des Endpunktes

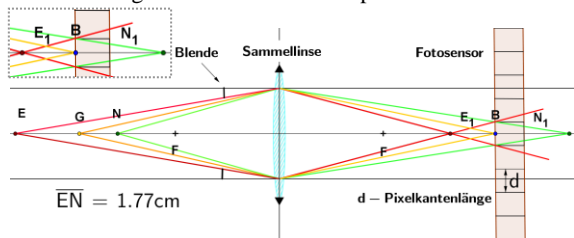


Abb. 4: Änderung der Schärfentiefe durch die Einführung einer Blende (Abb. 1-4 erstellt mit GeoGebra [1])

Die GeoGebra-Simulation erlaubt es, durch Veränderung der Gegenstandsweite, der Brennweite, des Blendendurchmesser und der Pixelkantenlänge Aussagen zur Abhängigkeit der Schärfentiefe zu treffen.

Leistungsstarke Schülerinnen und Schüler können mit Hilfe der Linsengleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad \{3\}$$

(mit f-Brennweite, g-Gegenstandsweite und b-Bildweite)

und der Anwendung des Strahlensatzes, entsprechend der Abbildung 5 :

$$\frac{D}{d} = \frac{b_N}{b_N - b} \quad \{4\}$$

(mit D - Blendendurchmesser und d - Pixelkantenlänge)

die Formel für die Gegenstandsweiten des Nah- bzw. Fernpunktes (nach [2]) herleiten.

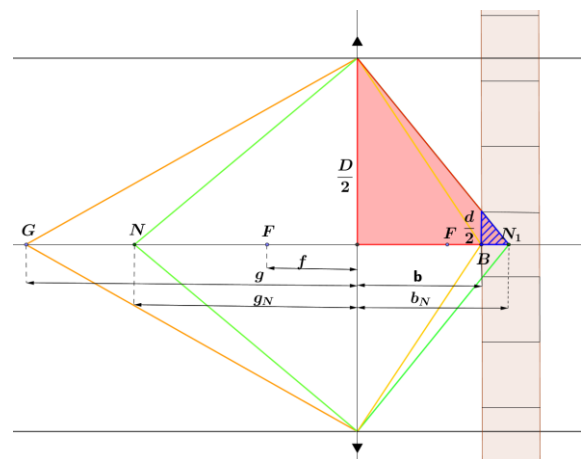


Abb. 5: Zur Herleitung der Formel für die Gegenstandsweite des Nahpunktes (erstellt mit GeoGebra [1])

Wird die Formel 3 nach b umgestellt und damit b in Formel 4 ersetzt, ergibt sich nach der Umstellung für die Gegenstandsweite des Nahpunktes folgender Ausdruck:

$$g_N = \frac{Dfg}{fD + d(g-f)} \quad \{5\}$$

Um später einen besseren Bezug zu der Digitalkamera zu ziehen, wird die Blendenzahl k [5], die auf den Kameras angegeben ist, eingeführt. Sie ist definiert als

$$k := \frac{f}{D} \quad \{6\}$$

Damit ergibt sich für die Gegenstandsweite des Nahpunktes

$$g_N = \frac{g \cdot f^2}{f^2 + d \cdot k(g - f)} \quad \{7\}$$

Nach der gleichen Methode lässt sich auch die Gegenstandsweite des Endpunktes ermitteln:

$$g_E = \frac{g \cdot f^2}{f^2 - d \cdot k(g - f)} \quad \{8\}$$

Diskutiert man die erhaltenen Ausdrücke, so kann man erkennen, dass Lichtpunkte hinter dem Fokuspunkt G in größerer Entfernung noch scharf abgebildet werden als Lichtpunkte vor dem Fokuspunkt. Diese und alle anderen Abhängigkeiten lassen sich auch im Experiment bestätigen.

3. Modellexperimente zur Schärfentiefe

3.1 Demonstrationsexperiment Lochblende-Schärfentiefe

Zur Verdeutlichung des Zusammenhanges zwischen einer Blende und der Schärfentiefe eignet sich ein Versuchsaufbau wie er in Abbildung 6 dargestellt ist.



Abb. 6: Demonstrationsversuch zur Verdeutlichung des Zusammenhanges zwischen Blende und Schärfentiefe [6]

Die Schülerinnen und Schüler kennen bereits den Aufbau zur Bildentstehung an einer Sammellinse aus dem Unterricht. Die Abstände werden so gewählt, dass das Bild des Perl-Ls scharf auf dem Schirm abgebildet wird. Danach wird der Schirm so verschoben, dass ein unscharfes Bild entsteht (Abb. 7 links). Zwischen dem Perl-L und der Linse wird nun eine geöffnete Blende gestellt. Diese wird langsam geschlossen, bis das Bild wieder als scharf erkennbar ist (Abbildung 7 rechts).

Neben der Erkenntnis, dass eine Verringerung des Blendendurchmessers eine Vergrößerung der Schärfentiefe bewirkt, ist ebenfalls eine Verringerung der Helligkeit erkennbar.

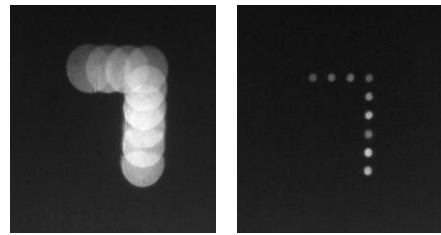


Abb. 7: links: unscharfes Bild, rechts: scharfes Bild des Perl-Ls nach Verringerung des Blendendurchmessers [6]

3.2. Experiment zur quantitativen Ermittlung der Schärfentiefe

Benutzt man zwei nah beieinanderstehende selbstleuchtende Objekte, so ist man in der Lage auch quantitative Aussagen über die Schärfentiefe treffen zu können. Wie im Bild 3.3 dargestellt, wurden 2 Kerzen als Gegenstände gewählt, da die Kerzenflamme durch ihre charakteristische Form und bei lichtstarken Kerzen darüber hinaus sogar das abgebildete Kerzenwachs für die Beurteilung des Schärfeneindrucks herangezogen werden kann. Mit diesem Aufbau können die Abhängigkeiten zwischen Gegenstandsweite, Blendendurchmesser und - etwas eingeschränkt - Brennweite zur Schärfentiefe ermittelt werden.

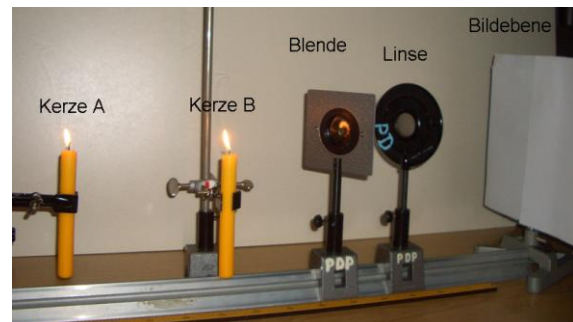
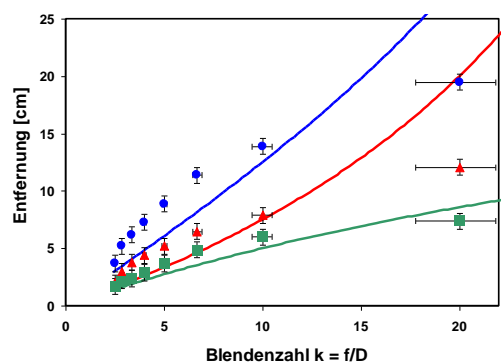


Abb. 8: Aufbau zur Ermittlung von Abhängigkeiten zwischen dem Blendendurchmesser, der Brennweite der Sammellinse, der Gegenstandsweite und der Schärfentiefe [6]

Die eine Kerze wurde dafür entsprechend der Linsengleichung scharf abgebildet, während die andere Kerze jeweils nach hinten bzw. vorne verschoben wurde, bis sie unscharf erschien. Die Abstände a_N und a_E (Abbildung 1) zwischen den Kerzen wurden gemessen. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel für eine Messung dieser Abstände in Abhängigkeit der Blendenzahl. Hier wird erkennbar, dass die Schärfentiefe mit höherer Blendenzahl, dementsprechend kleinerem Blendendurchmesser, zunimmt. Des Weiteren ergibt sich, dass der Abstand a_E stärker als der Abstand a_N ansteigt.



a_E - \blacktriangle , a_N - \blacksquare s - \bullet

Abb. 9: Abhängigkeit der Abstände zwischen Nah- bzw. Fernpunkt und der Gegenstandsweite des Fokuspunktes von der Blendenzahl bei $f = 0,1$ m und $g = 0,35$ m, Symbole: Messwerte, Linie: Theorie [6]

Ein Vergleich mit der Theorie zeigt, dass die Messwerte dem Verlauf der theoretischen Linie folgen. Da mit größer werdendem Abstand der Objekte zum Schirm das Auflösungsvermögen des Auges eine immer stärkere Rolle spielt, wächst der Messfehler mit zunehmender Blende. Für größere Blendendurchmesser konnte jedoch eine gute Übereinstimmung gefunden werden.

Für gute Messergebnisse können folgende Einstellungen empfohlen werden: Der Blendendurchmesser kann zwischen 0,003 m bis 0,04 m eingestellt werden. Es können Sammellinsen mit Brennweiten zwischen 0,05 m und 0,1 m verwendet werden. Die Gegenstandsweite des Fokuspunktes sollte nicht über 0,35 m liegen.

4. Vergleich mit der Praxis

Die theoretisch oder experimentell ermittelten Abhängigkeiten zur Schärfentiefe können mit einem manuell bedienbaren Fotoapparat bestätigt werden. Abbildung 10 zeigt die Abhängigkeit bezüglich der Blendenzahl. Bei allen Fotos wurde auf das Wort „macht“ fokussiert. Die Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit der Schärfentiefe bezüglich der Gegenstandsweite.

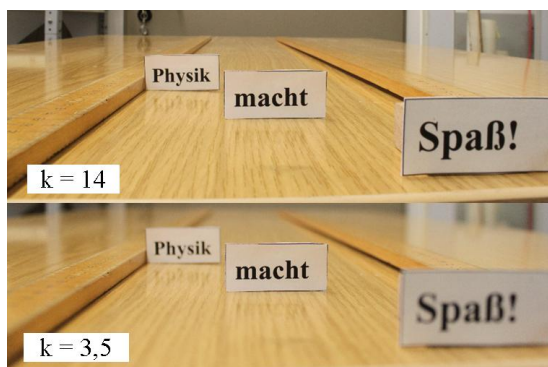


Abb. 10: Die Schärfentiefe in Abhängigkeit der Blendenzahl bei konstanter Gegenstandsweite

Mit dem Wissen über die Abhängigkeiten bezüglich der Schärfentiefe können die Schülerinnen und Schüler ermutigt werden, die Bildgestaltung ihrer Fotos zu beeinflussen. Allerdings muss beachtet werden, dass Handykameras ein Objektiv mit einer sehr kleinen Brennweite besitzen und dadurch das Gestaltungsmittel der Schärfentiefe nicht nutzbar ist.

Jedoch kann man selbst mit vollautomatischen Kameras mit einigen Tricks die Schärfentiefe beeinflussen: Die Kameras wählen immer eine mittlere Brennweite, so dass die Belichtungszeit so kurz ist, dass ein Verwackeln des Bildes verhindert wird. Durch eine entsprechende Beleuchtung kann die Blendenzahl und somit die Schärfentiefe beeinflusst werden. Durch eine Erhöhung der ISO-Zahl wird das Lichtsignal elektronisch verstärkt, was eine Beeinflussung der Belichtungszeit und somit auch der Blendenzahl nach sich zieht.

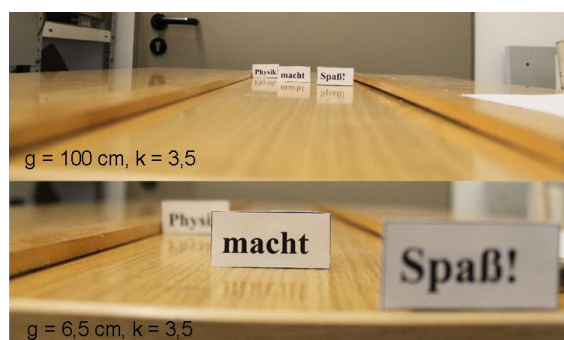


Abb. 11: Die Schärfentiefe in Abhängigkeit der Gegenstandsweite

Eine Unschärfe im vorderen Bereich des Fotos kann durch ein Fokussieren von weiter entfernten Objekten erreicht werden.

5. Zusammenfassung

Das Thema der Schärfentiefe lässt sich auf vielfältige Weise in den Optikunterricht einbinden. Ausgehend von der alltäglichen Erfahrung von Fotos, die in vielen Ebenen scharfe Objekte abbilden, kann der Begriff Schärfentiefe eingeführt werden. Die Herleitung der Formel stellt unter Beweis, dass die Alltagserfahrung sehr gut mit der Theorie der geometrischen Optik erklärt werden kann. Der Einfluss einer Blende auf die Schärfentiefe kann mit einem einfachen Demonstrationsexperiment verdeutlicht werden. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass sich weitere Beeinflussungsgrößen, wie die Brennweite der Linse und die Gegenstandsweite des Fokuspunktes quantitativ messen lassen. Allerdings ist dies nur für eingeschränkte Parameterbereiche möglich, da das Auflösungsvermögen unseres Auges auch von der Entfernung abhängt und dies nicht berücksichtigt werden kann. Die im Physikunterricht gesammelten

Erkenntnisse können die Schülerinnen und Schüler auf Kompaktkameras übertragen und so einen Einfluss auf die Bildgestaltung nehmen.

6. Literatur

- [1] Homepage der kostenlose Mathematik-Software GeoGebra: <http://www.geogebra.org> (Stand 05/2011)
- [2] Leibing, Tillmann; Völker, Matthias; Trefzger, Thomas (2009): Digitale Fotografie im Physikunterricht. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Bochum 2009
- [3] Brandt, Reinhard (2008): Die Digitalkamera. Grundprinzipien der Digitalfotografie in der 8. Klasse erarbeiten. In: Naturwissenschaften im Unterricht. Physik, 19 (2008) 105/106, S. 75-81
- [4] Colicchia, Guiseppe; Waltner, Christine; Hopf, Martin; Wiesner Hartmut (2008): Einfluss eines Lochs auf die Sehschärfe. In PhyDid 1/7 (2008) S. 15-19
- [5] Demtröder, Wolfgang (2004): Experimentalphysik 2, 3. Auflage, Springer Verlag
- [6] Winnik, Xaver (2011): Digitalfotografie im Physikunterricht. Unveröffentlichte Bachelor - arbeit